DOI: 10.22067/jacsm.2022.74025.1075
نشریهٔ علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک
سال سی و سه، شمارهٔ یک، ۱٤۰۰(۱۱۱-۹۳)

خنک‌کاری مجموعه باتری‌های لیتیوم-یون بااستفاده از نانوسیال توسط چاه حرارتی *

مقاله پژوهشی

اکرم جهان‌بخشی[۱] افشین احمدی ندوشن[۲] مرتضی بیاره[۳]

چکیده *در پژوهش حاضر خنک‌کاری مجموعه‌ای از باتری‌های لیتیوم- یون (انباره)، توسط چاه حرارتی (heat sink) میکروکانالی دارای میکرولوله‌های موجی‌شکل به‌همراه نانوسیال نقره- (آب- اتیلن گلیکول۵۰٪) بررسی شده‌است. برای حل معادلات و کوپل میدان سرعت و فشار، از نرم‌افزار انسیس- فلوئنت و روش سیمپل (Simple) استفاده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد، این سیستم می‌تواند دمای انبارهٔ لیتیوم-یون را بین ۲۹۵ تا ۳۰۵ درجهٔ کلوین حفظ کند و در تمام غلظت‌های مطالعه‌شده، ماکزیمم اختلاف دمایی در سطح انباره، به‌ترتیب ۵ و ۷ درجهٔ کلوین است. هم‌چنین مشخص شد که افزایش غلظت نانوسیال دمای یکنواخت‌تری را برای انباره فراهم می‌آورد و در رینولدزهای بالاتر، اگرچه توزیع دما یکنواخت‌تر است اما افزایش غلظت نانوسیال اثر محسوسی ندارد، مثلاً در Re = ۳۰۰ با افزایش غلظت از صفر تا ۱٪، بهبود یکنواختی دمای سطح ٤/۵٪ است. از طرفی افزایش عدد رینولدز بر قدرت پمپاژ سیال خنک‌کننده تأثیر منفی دارد. هم‌چنین نرخ تولید آنتروپی حرارتی و اصطکاکی با افزایش کسر حجمی نانوذرات کاهش می‌یابد به‌طوری‌که در غلظت ۱٪ میزان کاهش آنتروپی اصطکاکی نسبت‌به سیال خالص برابر ۹٪ است.*

واژه‌های کلیدی خنک‌کاری، باتری‌های لیتیوم- یون، چاه حرارتی، موجی‌شکل، میکروکانال، میکرولوله، نانوسیال.

مقدمه

باتری‌های لیتیوم- یون، به‌دلیل ظرفیت حرارتی مناسب، طول عمر نسبتاً بالا و نرخ تخلیهٔ پایین خودبه‌خود، درمقایسه با سایر انواع باتری‌ها در صنایع مختلفی ازجمله در خودروهای الکتریکی به‌کار گرفته می وند؛ اما چالش‌های متعددی در استفاده از این باتری‌ها وجود دارد که می‌توان به پایداری حرارتی و یا انفجار آنها در اثر گرم شدن بیش از اندازه و یا توزیع حرارت غیر یکنواخت اشاره نمود؛ لذا طراحی و کاربرد یک سیستم خنک‌کنندهٔ باتری و مدیریت حرارتی که قادر به ایجاد شرایط کاری مناسب و ایمن باشد، مورد توجه است [1]. در سال‌های اخیر ایدهٔ ارائهٔ خودروهای تمام الکتریکی، هیبرید الکتریکی و پیل سوختی بسیار مورد توجه فعالان این عرصهٔ صنعتی بوده‌است تا جایگزین خودروهای احتراق داخلی شوند. این نسل از خودروها دارای باتری به‌عنوان بخش ذخیره‌ساز انرژی در قوای محرکهٔ خود هستند [2]. ماشین‌های الکتریکی در بسیاری از موارد شبیه ماشین بنزینی و گازوییلی هستند و تنها تفاوت آنها جایگزینی موتور احتراق با یک باتری قابل شارژ است. این باتری، موتور الکتریکی را تأمین می‌کند و موتور الکتریکی، چرخ‌ها را به حرکت در می‌آورد. به‌طور کلی باتری‌ها پرکاربردترین نوع سامانهٔ ذخیرهٔ انرژی هستند که دارای قیمت کم، قابلیت جابه‌جایی آسان و توانایی کار در شرایط مختلف هستند. باتری‌ها انرژی برق را به‌روش آزاد شدن انرژی نهفته در مواد شیمیایی موجود در خود، تولید می‌کنند. باتری‌های لیتیوم- یون، در بین

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۰/۹/۱٤ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۰/۱۰/۲۵می‌باشد.
(۱) دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد
(۲) نویسندهٔ مسئول: دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد
(۳) دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد
Email:ahmadi@sku.ac.ir

انواع دیگر باتری‌ها، باتوجه به قیمت تمام‌شدهٔ پایین‌تر، طول عمر بالاتر و چگالی انرژی بالا، مورد توجه و کاربرد بیشتری در صنعت خودروهای الکتریکی هستند. پیشرفت چشم‌گیر در فناوری باتری‌های لیتیوم- یون سبب شده‌است تا صاحبان صنایع و پیشگامان عرصهٔ فناوری بتوانند محصولات جدید مانند انواع ماهواره و فضاپیما، ایستگاه‌های فضایی، خودروهای برقی و هیبریدی و انواع وسایل ارتباطی پیشرفته را به بازار معرفی کنند. هم‌چنین نوع فناوری مورد استفاده در متالوژی این نوع باتری‌ها سبب شده‌است باتری‌های قابل انعطاف و انحناپذیر نیز به بازار معرفی شوند [4-3]؛ به‌عنوان مثال ساختار یک سلول باتری لیتیوم- یون مدل ۱۸۶۵ شامل یک جعبهٔ استوانه‌ای به‌قطر ۱۸ میلی‌متر و طول ٦٥ میلی‌متر و یک سَری است که درون آنها دورپیچی برگرفته از کاتد، جداکننده و آند به‌ترتیب در کنار یکدیگر و غوطه‌ور در محلول الکترولیت قرار دارند. جنس کاتد سلول باتری لیتیوم- یون عموماً از ٪۲ آلومینیوم، ٪۱۱ لیتیوم، ٪۱٤ کبالت و ٪۷۳ نیکل تشکیل شده‌است. هم‌چنین آند سلول مذکور از گرافیت (کربن) خالص تشکیل شده‌است. اشاره شد که مشکلات گرمایی موجود مربوط به این باتری‌ها استفاده از آنها را برای مصارف بالای انرژی، با محدودیت‌هایی روبه‌رو کرده‌است؛ زیرا بالا بودن دمای عملکردی در این باتری‌ها می‌تواند به‌طور مؤثری منجر به کاهش طول عمر آنها شود و حتی سبب ایجاد احتراق و آتش‌سوزی نیز گردد. به‌طور کلی عملکرد مطلوب باتری‌های لیتیوم- یون، تنها بستگی به شرایط دمایی باتری دارد، زیرا این باتری‌ها نسبت‌به دمای کاری به‌شدت حساس هستند و باید در یک بازهٔ دمایی مشخص مورد استفاده قرار گیرند. از سوی تولیدکنندگان این باتری‌ها، بهترین دمای کارکرد، ماکزیمم تا ٤٥ درجهٔ سلسیوس بیان شده‌است و تأکید شده‌است که نباید از محدودهٔ ایمن آنها یعنی ٦٠ درجهٔ سلسیوس بیشتر گردد. ازاین‌رو مطالعات پیرامون سیستم‌های مدیریت حرارتی این باتری‌ها امروزه مورد توجه بسیاری از پژوهشگران است و مطالعاتی پیرامون سامانه‌های خنک‌کنندهٔ مؤثر با کارایی بالا به‌منظور مدیریت گرمایی این تجهیزات انجام گرفته‌است. در تحقیقات انجام‌گرفته به‌منظور برآورده کردن شرایط مطلوب مدیریت حرارتی و حفظ دمای باتری‌ها در محدودهٔ استاندارد و ایمن، به روش‌های متنوعی هم‌چون خنک‌کاری با هوا، خنک‌کاری با انواع مایع و نانوسیالات، لولهٔ حرارتی و استفاده از مواد تغییر فاز دهنده اشاره شده‌است [8-5]. در پژوهش حاضر نیز به کاربرد میکروچاه حرارتی با هندسه‌ای جدید، برای خنک‌کاری این باتری‌ها پرداخته شده‌است. در ادامه باید اشاره کرد که در سال‌های اخیر ساخت ابزارها در ابعاد بسیار کوچک سبب انجام تحقیقات گستردهٔ علمی درزمینهٔ سیستم‌های میکروسیالی و میکروالکترو مکانیکی شده‌است. میکروکانال‌ها و میکروپمپ‌ها یکی از اجزای اساسی این‌گونه سیستم‌ها هستند. میکروکانال عبارت است از تعداد زیادی کانال با ابعاد میکرو و طول مشخص بین ۱ تا ۱۰۰ میکرومتر که در سطح غیرفعال الکتریکی تجهیز مورد نظر قرار می‌گیرد و برای دفع گرمای منتشر شده کاربرد دارد. میکروکانال‌ها به‌دلیل داشتن مزیت‌های بسیار از قبیل ابعاد هندسی کوچک، نسبت سطح به حجم بالا، رسانایی گرمایی بالا در بدنهٔ جامد و هم‌چنین نیاز به مقدار حجم کم از سیال خنک-کننده، به‌عنوان یک راه حل عملی مفید برای دفع گرما از تجهیزات الکترونیکی می‌باشند [9]. در طراحی تمامی انواع سیستم‌های مدیریت حرارتی لازم است که در ابتدا رفتار حرارتی باتری به‌خوبی شناخته و تحلیل گردد [10].

از جملهٔ این مطالعات می‌توان به پژوهش لیانگ و همکاران [11] اشاره داشت که اثر دما، دبی جریان سیال

خنک‌کننده و دمای محیط را برای یک سیستم خنک-کاری لولهٔ گرمایی بررسی کردند. ایشان نتیجه گرفتند که خنک‌کاری متناوب با مصرف انرژی کمتری همراه است و جایگزین مناسبی برای سیستم‌های خنک‌کاری پیوسته است. هم‌چنین دریافتند که دبی سیال خنک‌کننده دارای حد بیشینه در خنک‌کاری باتری می‌باشد.

مشایخی و همکاران [12] یک سیستم مدیریت حرارتی ارائه دادند و در میکروکانال‌های تعبیه‌شده برای بخش فعال از نانوسیال و در بخش غیرفعال از پارافین و فوم مسی استفاده کردند. ایشان در نتایج کار خود به تأثیر مثبت این سیستم ترکیبی در مدیریت حرارتی باتری‌ها اشاره کردند و بیان کردند اگر چه بازده سیستم‌های خنک‌کاری با مایع از سیستم‌های شامل جریان هوا بیشتر است، اما اغلب سنگین‌تر و پرهزینه‌تر هستند و هزینه-های نگه‌داری بیشتری نیاز دارند.

کووان و همکاران [13] به بررسی خنک‌کاری یک باتری بااستفاده از مایع عبوری از درون مینی کانال‌های اطراف آن پرداختند و نتیجه گرفتند که استفاده از این روش می‌تواند دمای باتری‌ها را در محدودهٔ ۳۰۰ تا ۳۱۲ کلوین نگه دارد.

ساتو [14] به شبیه‌سازی ترمودینامیکی مقدار گرمای تولیدشده در یک انباره پرداخت و نتایج این کار را با مطالعات آزمایشگاهی مقایسه نمود. وی تأکید داشت گرمای ورودی و خروجی به‌ترتیب به عمل شارژ و دشارژ انباره بستگی دارد و فاکتورهای تولید حرارت را به سه دسته تقسیم نمود: ۱) مقدار حرارت واکنش (Qr)، ۲) مقدار حرارت قطبش (Qp) و ۳) مقدار حرارت ژول (QJ). علاوه‌بر این، میزان مشارکت هر یک از این عوامل را با تقسیم هر عامل تولید حرارت برای هر نرخ شارژ و تخلیهٔ مشخص، به‌صورت کمی بیان کرد.

فنگ و همکاران [15] یک سیستم خنک‌کننده شامل جریان هوا و تبخیر آب را برای خنک‌کاری باتری‌ها مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعهٔ تجربی نشان داد که این سیستم مدیریت حرارتی دمای کارکرد باتری را در محدودهٔ کمتر از ٦٠ درجهٔ سلسیوس نگه می‌دارد.

محمدیان و ژانگ [16] یک سیستم خنک‌کاری جدید با جریان هوا را برای باتری‌های لیتیوم- یون ارائه کردند. در این طرح، کانال‌های جریان هوا دارای پره بودند و بیان کردند که وجود پره‌ها منجر به کاهش دمای بیشینهٔ باتری و توزیع یکنواخت‌تر دما شده‌است.

در پژوهش انجام‌شده توسط پارک [17] خنک‌کاری مجموعه‌ای از باتری‌ها شامل ۳٦ باتری مستطیلی، به‌کمک یک سیستم شامل ۳۷ مسیر خنک‌کاری با جریان اجباری هوا به‌صورت عددی بررسی شده و نتیجه گرفته‌است که برای خنک‌کاری باتری به این روش، دبی جریان زیادی از هوا لازم است.

اشمالتزتیگ و همکاران [18] یک مدل پیش‌بینی طول عمر باتری لیتیوم- یونی را براساس تست‌های تسریع‌شده بررسی کردند و توسعه دادند. ایشان به‌منظور بررسی اثر دماهای مختلف روی افت ظرفیت باتری، تست‌های عمر تقویمی انجام دادند و هم‌چنین چند تست عمر سیکلی را نیز بااستفاده از عمق دشارژهای مختلف بررسی کردند و در ادامه، داده‌های تست عمر سیکلی و عمر انبارداری را به‌منظور یافتن معادلات ریاضی استفاده کردند و نوع وابستگی زوال باتری به پارامترهای مختلف را مشخص نمودند.

در مطالعهٔ تجربی وو و همکاران [19] استفاده از لوله‌های حرارتی برای خنک‌کاری باتری‌ها بررسی شد. آنها نشان دادند که توجه به سطح تماس موجب افزایش بازده در سیستم مورد نظر می-شود. ایشان در ابتدا از دو لولهٔ حرارتی برای سیستم مدیریت حرارتی باتری استفاده کردند که به‌دلیل نامناسب بودن سطح تماس، عملکرد مطلوبی در حفظ دمای باتری در محدودهٔ مجاز نداشت. ازاین‌رو آنها برای افزایش انتقال حرارت، پخش و

بهبود خواص سطح تماس، از آلومینیوم استفاده کردند و توانستند دمای کارکرد باتری را از ٤٥ درجه به حدود ۳۸ درجه کاهش دهند.

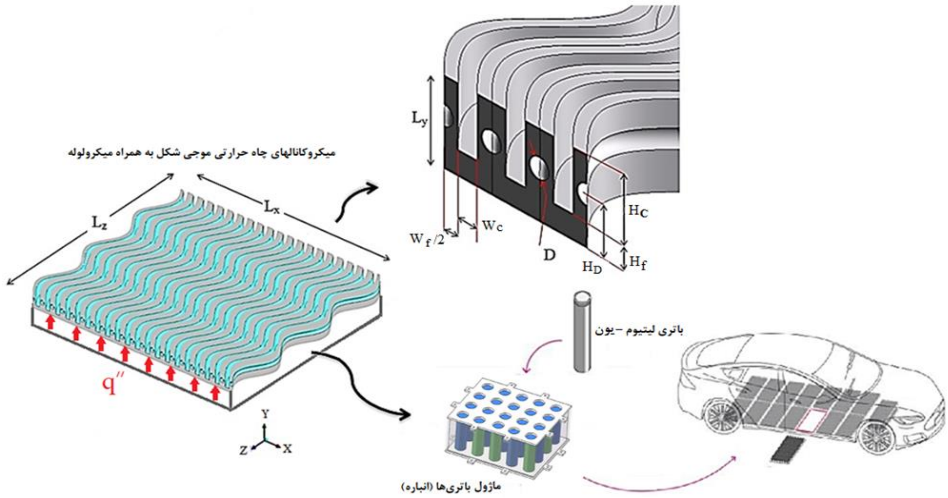
در مطالعات نلسون و همکارانش [20] مدلی از یک سیستم مدیریت گرمایی برای کنترل دما در مجموعه‌ای از باتری‌های لیتیوم- یون ارائه شد. آنها با درنظر گرفتن بدترین شرایط کاری از نظر نرخ دشارژ و توان مصرفی، نشان دادند که استفاده از یک سیال خنک‌کنندهٔ دی-الکتریک برای کنترل دمای باتری بسیار بهتر از هوا است. نتایج این مطالعه هم‌چنین نشان می‌دهد که عایق‌کاری محفظهٔ باتری در تابستان، نرخ افزایش دمای باتری را به‌میزان چشم‌گیری کاهش می‌دهد.

کریمی و همکاران [21] با ارائهٔ یک مدل ریاضی به بررسی عملکرد سیستم‌های متنوع در کنترل گرمای باتری‌ها پرداختند. ایشان گزارش دادند که استفاده از هوا به‌عنوان سیال خنک‌کننده و ایجاد جابه‌جایی اجباری در کنار چیدمان و هندسهٔ مناسب کانال‌های خنک‌کننده، می‌تواند به‌عنوان سیستمی کارآمد و کم‌هزینه در کنترل دمای یک مجموعه باتری به‌کار رود.

ژائو و همکارانش [22] از روش خنک‌کاری توسط مایع برای باتری‌های استوانه‌ای استفاده کردند. هدف آنها نگه‌داری حداکثر دمای انبارهٔ باتری در محدودهٔ ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد و اطمینان از اختلاف دما در سلول‌ها بود. متغیرهایی که آنها در مطالعهٔ خود بررسی کردند، نرخ جریان سیال، مسیر جریان سیال و اندازهٔ ورودی سیستم خنک‌کننده بود. آنها توانستند توسط جریان سیال با سرعت برابر ۰/۰۰۱ کیلوگرم بر ثانیه، دمای باتری‌های استوانه‌ای را به کمتر از ٤٠ درجهٔ سانتی‌گراد برسانند. براساس این نتایج مزایای سیستم خنک‌کاری مایع در مقایسه با سیستم جابه‌جایی طبیعی هوا بیان شده‌است.

با مرور کلی تحقیقات انجام گرفته، این نتیجه حاصل می‌شود که به‌طور کلی خنک‌کاری باتری‌ها به سه روش انجام می‌گیرد؛ به این صورت که اگر در فرآیند خنک‌کاری از انرژی خارجی برای به گردش درآوردن سیال استفاده شود این روش را روش فعال می‌نامند. در این روش معمولاً از هوا، آب یا جریان نانوسیال به‌عنوان سیال خنک‌کننده استفاده می‌شود و برای به حرکت در آوردن از تجهیزاتی هم‌چون پمپ یا فن استفاده می‌شود که انرژی مصرف می‌کنند. در روش دوم برای خنک-کاری نیازی به مصرف انرژی نیست؛ به‌طور مثال می‌توان از مواد تغییر فاز دهنده برای طراحی یک سیستم مدیریت حرارتی استفاده کرد. سومین حالت خنک کردن را می-توان کاربرد هم‌زمان دو روش قبلی دانست که به‌منظور بهره‌مندی از مزایای هر دو روش به‌کار می‌رود.

در این مقاله از چاه حرارتی میکروکانالی موج‌دار، دارای میکرولولهٔ موجی‌شکل، به‌عنوان یک سیستم خنک‌کاری نوین برای خنک‌سازی انبارهٔ باتری لیتیوم-یون استفاده شده‌است و رفتار حرارتی و هیدرودینامیکی این چاه حرارتی، مورد بررسی قرار گرفته‌است تا عملکرد آن برای ارائهٔ یک سیستم مدیریت حرارت بهینه برای باتری‌های لیتیوم- یون، بیان گردد. علاوه‌بر شکل هندسی، انتخاب نوع سیال عامل در چاه حرارتی نیز دارای اهمیت است؛ لذا در این پژوهش به‌منظور بهبود عملکرد چاه حرارتی، نانوسیال زیستی نقره- (آب- اتیلن گلیکول ۵۰٪) درنظر گرفته شده‌است. درواقع در این پژوهش با ترکیب دو هندسهٔ میکروکانال و میکرولوله در یک چاه حرارتی موجی‌شکل، تلاش شده‌است تا طرحی جدید از ساختار میکروچاه‌های خنک‌کننده برای مجموعه باتری‌ها ارائه شود.



شکل ۱ هندسهٔ مسئله و کاربرد آن در خنک‌کاری انبارهٔ لیتیوم- یون

تشریح مدل

شکل (۱) کلیت هندسی میکروچاه حرارتی را نشان می‌دهد که دارای ۵۰ کانال موجی‌شکل است و بین هر دو میکروکانال یک میکرولولهٔ موجی‌شکل افزوده شده‌است که اقدامی در جهت ارتقای ساختار هندسی و عملکرد این سیستم خنک‌کننده‌است. فرم موجی‌شکل کانال و لوله در طول هیت سینک به‌صورت یک تابع سینوسی براساس معادلهٔ (۱) در نظر گرفته شده‌اند.

$$S(z) = a_W \sin\frac{2\pi z}{L_W} \qquad (۱)$$

مقدار پارامترهای a_W و L_W برابر $a_W = 138\mu m$ و $L_W = 5mm$ انتخاب شده‌است. این مقادیر براساس هندسهٔ بهینهٔ معرفی‌شده در پژوهش الراشد و همکاران که به بررسی یک هیت سینک میکروکانالی موجی‌شکل پرداخته‌اند، درنظر گرفته شده‌است [23]. باتوجه به ساختار شیمیایی و مواد تشکیل‌دهنده، باتری‌های لیتیوم-یون در یک بازهٔ دمایی بین ۲۵ تا ۴۵ درجهٔ سانتی‌گراد بهترین کارایی را از خود نشان می‌دهند [24]. افزایش دمای باتری بیشتر از این مقدار علاوه‌بر ملاحظات ایمنی، طول عمر باتری را کاهش می‌دهد و درنتیجه هزینهٔ استفاده از آن را به‌شدت بالا خواهد برد. از طرفی برای تأمین مصارف بالای انرژی تعداد زیادی از این سلول‌ها باید به‌صورت سری یا موازی کنار هم و در یک مجموعه (انباره) قرار گیرند. درنتیجه توزیع دمای به‌وجود آمده در این مجموعه باعث می‌شود که سلول‌های مختلف داخل مجموعه، دماهای متفاوتی را تجربه کنند. این امر باعث افت ولتاژ خروجی کل مجموعه و کاهش طول عمر سلول‌ها خواهد شد. باتوجه به مشکلات ذکر شده، یک سامانهٔ مدیریت حرارتی باید بتواند علاوه‌بر کاهش دمای کل مجموعه، توزیع دمایی یکنواخت و یکسانی را برای انباره ایجاد کند. جدول (۱) پارامترهای ابعادی هندسی چاه حرارتی را مبتنی بر شکل (۱) نشان می‌دهد. در این مطالعه، جریان در محدودهٔ آرام قرار دارد و برای مدل‌سازی و تحلیل عددی عملکرد خنک‌کنندهٔ باتری باید معادلات حاکم بر انباره و معادلات نانوسیال خنک‌کننده حل شوند.

نانوسیال و معادلات حاکم. مفهوم نانوسیال به شکل جدیدی از محیط انتقال گرما اشاره دارد که از طریق معلق ساختن ذرات فلزی و غیرفلزی در مقیاس نانو در سیال پایه تولید می‌شوند و سیالات حاوی این ذرات دارای هدایت گرمایی بیشتری نسبت‌به سیالات خالص هستند. در یک بررسی آزمایشگاهی سرافراز و هرمزی

[25] توانسته‌اند نانوذرات نقره را از برگ سبز چایی سنتز نمایند. در کار حاضر بنا به اطلاعات این پژوهشگران از مخلوط آب–اتیلن گیلیکول ۵۰٪ به‌عنوان سیال پایه و از نانوذرات نقره استفاده شده‌است و محاسبات خواص مخلوط نانوسیال براساس این پژوهش انجام گرفته‌است.

جدول ۱ پارامترهای ابعادی هندسهٔ چاه حرارتی

پارامتر	مقدار
Lx	۱۰mm
LY	۳۵۰µm
LZ	۱۵mm
Wf	۱۲۰µm
WC	۸۰µm
D	۷۰µm
Hf	۱۰۰µm
HC	۲۵۰µm
HD	۱۷۵µm

چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه، لزجت و رسانش حرارت نانوسیال براساس درصد حجمی نانوذرات موجود در نانوسیال توسط معادلات زیر محاسبه شده‌است [25]. در این معادلات ρ چگالی، C_p ظرفیت گرمایی ویژه، μ لزجت، k رسانش حرارتی، T دما و ϕ کسر حجمی نانوذره هستند و زیرنویس bf به سیال پایه، p به نانوذرات و nf به نانوسیال اشاره دارند.

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_{bf} + \phi\rho_p \quad (۲)$$

$$\rho_{nf}C_{p,nf} = (1-\phi)\rho_{bf}C_{p,bf} + \phi\rho_p C_{p,p} \quad (۳)$$

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1+2.5\phi) \quad (٤)$$

$$k_{nf} = k_{bf}[0.981 + 0.00114T(°C) + 30.661\phi \quad (۵)$$

معادلات حاکم بر مجموعهٔ باتری‌ها (انباره). معادلهٔ (٦) معادلهٔ دیفرانسیلی انتقال گرمای هدایت سه بعدی است [24]:

$$\frac{\partial \rho c_p T}{\partial t} = \nabla.(\lambda \nabla T) + q^{\cdot} \quad (٦)$$

در این معادله λ ضریب انتقال گرمای هدایتی در انباره، c_p گرمای ویژه در فشار ثابت و ρ چگالی است $q^{\cdot}$ نیز نرخ گرمای تولیدشده توسط انباره است که از معادلهٔ (۷) محاسبه می‌شود.

$$q^{\cdot} = \sigma_p|\nabla V_P{}^2| + \sigma_n|\nabla V_n{}^2| + q^{\cdot}_{ech} + q^{\cdot}_{short} \quad (۷)$$

σ_p و σ_n $(s.m^{-1})$ به‌ترتیب رسانندگی برق الکترودهای مثبت و منفی و V_P و V_n (V) پتانسیل برقی الکترودهای مثبت و منفی انباره هستند. جمله‌های اول و دوم معادلهٔ (۷) بیانگر گرمای ایجادشدهٔ الکترودهای انباره و جمله‌های سوم و چهارم به‌ترتیب بیانگر گرمای ایجادشده در اثر واکنش شیمیایی و جریان اتصال کوتاه داخل انباره است. مقدار گرمای تولیدی بااستفاده از معادلهٔ (۸) به‌دست می‌آید.

$$q^{\cdot}_{short} = \frac{\alpha(V_P - V_n)^2}{r_C} \quad (۸)$$

که در آن α $(m^2.m^3)$ مساحت ویژهٔ ورقهٔ الکترود انباره و r_C $(\Omega.m^2)$ مقاومت سطح تماس است. هم‌چنین برای گرمای تولیدشده در اثر واکنش شیمیایی معادلات (۹ و ۱۰) ارائه شده‌است.

$$q^{\cdot}_{ech} = j_{ech}[U - (V_P - V_n) - T\frac{dU}{dt}] \quad (۱۰)$$

$$j_{ech} = \alpha Y(U - V_P - V_n) \quad (۱۱)$$

که U ,Y از روابط (۱۱ و ۱۲) به‌دست می‌آیند:

$$Y = \left[\sum_{i=0}^{n} a_i\, DOD^i\right] \exp - [-c_1\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)] \quad (۱۲)$$

$$U = \left[\sum_{i=0}^{n} b_i\, DOD^i\right] - [c_2\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)] \quad (۱۳)$$

DOD مقدار تخلیه شدن انباره است. در این مطالعه فرض شده‌است که انباره دارای ۷۰٪ شارژ باشد که

مقدار تخلیG آن برابر ٪ ۳۰ است

$$DOD = \frac{VOL}{3600Q_{Ah}}\left(\int_0^t jdt\right) \quad (۱۴)$$

$$DOD = 1 - SOC$$

مقدار شارژ انباره SOC: (State of charge)

مقدار تخلیهٔ انباره DOD: (Depth of Discharge)

ضرایب معادلات U, Y در جدول (۲) آمده‌اند.

در این مطالعه دمای نزدیک به ۳۱۸ درجهٔ کلوین (معادل ۴۵ درجهٔ سانتی‌گراد) برای باتری‌های لیتیوم-یونی، دمای کاری مجاز در نظر گرفته شده‌است [24] و فرض شده‌است که چاه حرارتی برروی یک مجموعه از باتری‌های لیتیوم- یون قرار دارد و شار حرارتی ۵۰q˙ =(W/cm²) (طبق معادلهٔ ۷) از طرف کل انباره به مجموعه وارد می‌شود. این میزان شار حرارتی می‌تواند شرایط بحرانی دمایی برای مجموعهٔ انبارهٔ مورد نظر باشد که در زمان تخلیهٔ جریان باتری‌ها ایجاد می‌شود؛ ازاین‌رو عملکرد هیت سینک در این شرایط و قدرت خنک-کنندگی آن در حضور نانوسیال در حالت دمای بحرانی عملیاتی بررسی می‌شود.

معادلات پیوستگی، تکانه و انرژی. در ادامه معادلات پیوستگی، تکانه و معادلهٔ انرژی ارائه شده‌اند [23].

معادلهٔ پیوستگی:

$$\nabla.(\rho_{nf}\vec{u}) = 0 \quad (۱۵)$$

معادلهٔ مومنتوم:

$$\nabla.(\rho_{nf}\vec{u}\vec{u}) = -\nabla p + \nabla.(\mu_{nf}\nabla\vec{u}) \quad (۱۶)$$

معادلهٔ انرژی برای ناحیهٔ سیال:

$$\nabla.\left(\rho_{nf}\vec{u}C_{p,nf}T\right) = \nabla.(k_{nf}\nabla T) \quad (۱۷)$$

معادلهٔ انرژی برای بدنهٔ صلب سیستم خنک‌کننده:

$$\nabla.(k_s\nabla T) = 0 \quad (۱۸)$$

در معادلات بالا $\vec{u}$، بردار سرعت و p فشار هستند. زیرنویس s نیز به خواص ناحیهٔ جامد اشاره می‌کند که از جنس مس درنظر گرفته شده‌است.

تعریف پارامترهای مورد نیاز برای تحلیل عملکرد سیستم خنک‌کنندهٔ انباره. پارامتر θ با تعریف ارائه‌شده در معادلهٔ (۱۸) یکنواختی دمای سطح انباره را که توسط میکروهیت سینک در حال خنک شدن است، توصیف می‌کند.

$$\theta = \frac{T_{batteries,Max} - T_{batteries,min}}{T_{batterise,Meam}} \quad (۱۹)$$

در این معادله بیشینهٔ دمای سطح انباره با $T_{CPU,Max}$، کمینهٔ آن با $T_{CPU,min}$ و متوسط دمای سطح انباره با $T_{CPU,Meam}$ بیان شده‌است. ضریب انتقال حرارت کلی میکروچاه حرارتی نیز باتوجه به عملکرد خنک‌کاری آن به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$h = \frac{q''}{T_{batteries,Meam} - T_{in}} \quad (۲۰)$$

در مطالعهٔ حاضر روش خنک‌کاری فعال مد نظر است؛ ازاین‌رو برای به حرکت در آوردن جریان سیال از پمپ استفاده می‌شود. میزان توان پمپاژی لازم برای هیت سینک نیز از معادلهٔ (۲۰) براساس دبی حجمی و افت فشار داخلی هیت سینک محاسبه می‌گردد.

جدول ۲ ضرایب مورد نیاز معادلات U, Y

i	۰	۱	۲	۳	٤	٥
a_i	٤/۱۲	−۰/۸۰٤	۱/۰۷٥	−۱/۱۷۷	۰	۰
b_i	۱۱٦۸/٥۹	−۸۹۲۸	٥۲٥۰٤/٦	−۱۳٦۲۳۱	۱٥۸٥۳۱/۷	−٦۷٥۷۸/٥
c_i	-	۱۸۰۰	−۰/۰۰۰۹٥	-	-	-

$$W_{pump} = \dot{V}\Delta p \qquad (۲۱)$$

به‌منظور تحلیل عملکرد کلی نانوسیال در هیت سینک نیز عبارت PEC به فرم ارائه‌شده در رابطهٔ (۲۱) تعریف شده‌است.

$$PEC = \frac{h_{nf}/h_{bf}}{\Delta p_{nf}/\Delta p_{bf}} \qquad (۲۲)$$

قوانین ترمودینامیک نشان می‌دهند که انتقال گرما و جریان سیال در یک سیستم خنک‌کننده باعث بازگشت‌ناپذیری ترمودینامیکی و تولید آنتروپی می‌شود. تولید آنتروپی معیاری برای سنجش میزان بازگشت‌ناپذیری است و می‌تواند برای ارزیابی عملکرد فرایندهای ترمودینامیکی و سیستم‌های حرارتی استفاده شود. در مطالعهٔ حاضر آنتروپی تولیدی کل، شامل آنتروپی تولیدی حرارتی سیال در کل ناحیهٔ محاسباتی (سیال و جامد)، آنتروپی ناشی از شار حرارتی و آنتروپی تولیدی اصطکاکی است که به‌ترتیب عبارتند از [26]:

$$\dot{S}_{gen} = \dot{S}_h + \dot{S}_\mu - \dot{S}_q \qquad (۲۳)$$
$$\dot{S}_h = \dot{m}\int_{in}^{out} c_p \frac{dT}{T}$$
$$\dot{S}_q = \oint_A \frac{dQ}{T} \dot{S}_\mu = \dot{m}\int_{out}^{in} \frac{v}{T} dP \ ,$$

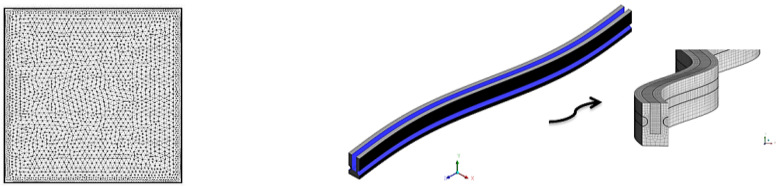
فرایند حل عددی و بررسی استقلال حل از شبکه

به‌منظور حل معادلات بیان‌شده در هندسهٔ مسئله از نرم‌افزار انسیس- فلوئنت استفاده شده‌است. از متد Upwind مرتبهٔ دوم برای حل معادلهٔ مومنتوم و هم‌چنین روش سیمپل با شبکهٔ فشار جابه‌جا شده برای کوپل میدان سرعت و فشار استفاده شده‌است. قید هم‌گرایی نیز مقدار 10^{-8} برای معادلهٔ انرژی و 10^{-6} برای دیگر معادلات انتخاب شده‌است. در مطالعهٔ حاضر بااستفاده از شرط مرزی تقارن، تنها یک کانال مدل‌سازی شده‌است و حجم کنترل مشخص‌شده درواقع قسمتی از یک میدان جریان تکرارشونده است. در ابتدای شبیه‌سازی باید مبحث استقلال از شبکه برای دقیق بودن نتایج خروجی بررسی گردد؛ ازاین‌رو در جدول (۳) توان مصرفی پمپ و حداکثر اختلاف دما در ورودی و خروجی چاه حرارتی نشان داده شده‌است. برای این منظور و با درنظر گرفتن میزان دبی جرمی یکسان برای جریان عبوری از میکروکانال و میکرولوله، عدد رینولدز برای کانال و لوله به‌ترتیب ۷۰۰ و ۷۰ و نانوسیال ۱٪ که بیشترین غلظت مطالعه‌شده در پژوهش حاضر می‌باشد، انتخاب شده‌است.

جدول ۳ نتایج تحلیل استقلال شبکه

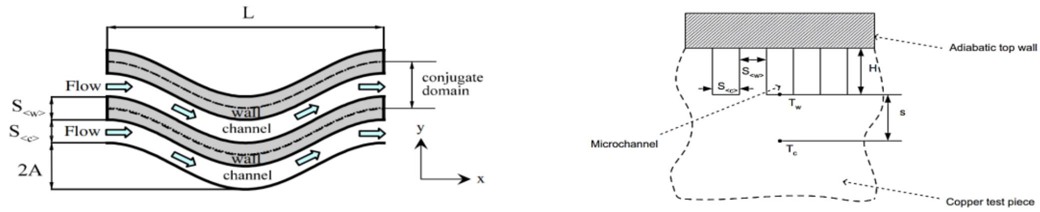
W_{pump} $[W]$	ΔT $[K]$	تعداد شبکه (هزار المان)
۰/۰۱۸٦	۳/۳۸٦	۲٤
۰/۰٤۷٥	۳/۳۸۷	۲۷
۰/۰٥٦۸	۳/۳۸۸	۷٤
۰/۰٥۸۷	۳/۳۸۸	۱۲۸
۰/۰٥۹۱	۳/۳۸۸	۱۹٥
۰/۰٥۹۱	۳/۳۸۸	۳۳۰

براساس جدول (۳) شبکهٔ دارای ۱۹٥ هزار المان به‌عنوان شبکهٔ حل انتخاب گردیده و تمامی حالات در این شبکه محاسبه شده‌است. شکل (۲) نمایی از شبکهٔ محاسباتی این پژوهش است.



(الف) چاه حرارتی (ب) سطح تماس انبارهٔ لیتیوم- یونی با هیت سینک

شکل ۲ نمایی از شبکهٔ محاسباتی مسئله



(الف) برشی از مقطع عرضی میکروکانال در هندسهٔ مرجع [27] (ب) پارامترهای ابعادی بین میکروکانال‌های موازی در هندسهٔ مرجع [27]

شکل ۳ هندسهٔ مسالهٔ اعتبارسنجی

جدول ٤ پارامترهای ابعادی هندسهٔ مسئلهٔ اعتبارسنجی

پارامتر	مقدار
S_w	۱۹۳ μm
S_C	۲۰۷ μm
S	۱۰۰ μm
H	٤۰٦ μm
A	۱۳۸ μm
L	۲۵ mm

جدول ۵ مقایسهٔ مقادیر $(T_{Max} - T_{min})$ در پژوهش حاضر با نتایج تجربی مرجع [27]

درصد خطا	نتایج مطالعهٔ حاضر	نتایج مرجع [27]	رینولدز
۳/۱۸	۹/۱۲	۹/٤۲	۳۰۰
۳/٦۸	۱۰/۹۸	۱۱/٤	٤۰۰
٤/۰٤	۱۲/۵۷	۱۳/۱	۵۰۰
٤/۰۱	۱٤/۱۱	۱٤/۷	٦۰۰
۳/۳۵	۱۵/۸۵	۱٦/٤	۷۰۰
۳/۰۷	۱۷/٦٤	۱۸/۲	۸۰۰

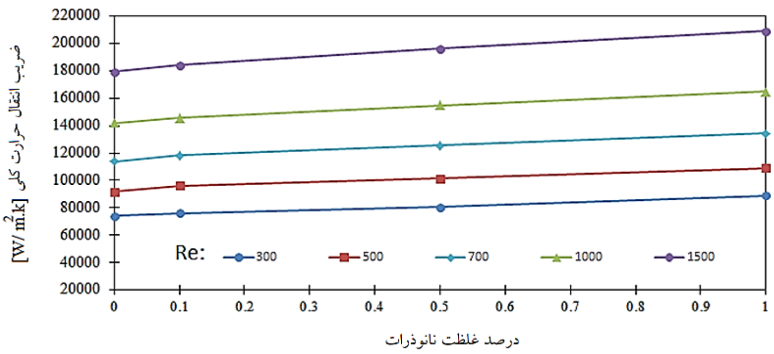
صحت سنجی مدل‌سازی

در ادامه به‌منظور صحت‌سنجی مدل‌سازی صورت گرفته، کار حاضر با نتایج آزمایشگاهی سو و همکارانش [27] مقایسه گردید. براساس این مقاله یک میکروکانال موجی‌شکل مدل‌سازی شده‌است و انتقال حرارت جابه‌جایی در میکروکانال موج‌دار و نیز رسانایی در بستر مسی به‌صورت سه‌بعدی درنظر گرفته شده‌است. شکل (۳) هندسهٔ مسئلهٔ اعتبارسنجی و جدول (٤) پارامترهای ابعادی آن را نشان می‌دهد. در جدول (۵) نیز مقادیر $(T_{Max} - T_{min})$ به‌دست آمده در کار حاضر با نتایج تجربی مرجع [27] مقایسه شده‌است. می‌توان مشاهده کرد که بین نتایج کار عددی حاضر و نتایج تجربی موجود سازگاری مناسبی وجود دارد.

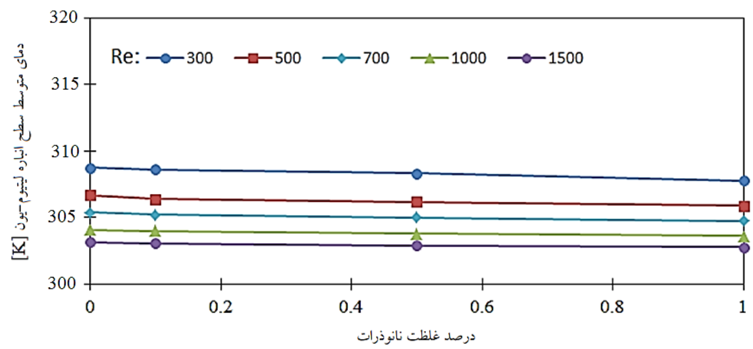
نتایج

بیشینه دمای انبارهٔ لیتیوم- یون حین تخلیهٔ جریان نباید از محدودهٔ مجاز تجاوز نماید، در غیر این‌صورت طول عمر باتری کاهش می‌یابد و باعث آسیب دائمی باتری می‌شود. در ادامه به بررسی عملکرد خنک‌کاری و پارامترهای هیدرولیکی و حرارتی هیت سینک

موجی‌شکل پرداخته می‌شود. هم‌چنین دمای سطح تماس انباره با چاه حرارتی در شرایط مختلف به‌صورت عددی بررسی می‌شود. در این پژوهش مدل‌سازی‌ها برای جریان نانوسیال نقره/ (آب- اتیلن گیلیکول ۵۰٪) در کسرهای حجمی مختلف نانوذرات شامل (صفر، ۰/۱٪، ۰/۵٪ و ۱٪)، و اعداد رینولدز (۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰، ۱۰۰۰و ۱۵۰۰) است. از شکل (٤) نتیجه می‌شود که افزایش نانوذرات و بالابردن غلظت نانوسیال موجب افزایش ضریب انتقال حرارت می‌گردد. هم‌چنین اثر افزایش غلظت نانوذرات، در جریان با رینولدزهای بالاتر، بیشتر است. زیرا افزایش کسر حجمی نانوذره، در عدد رینولدز ثابت، منجر به افزایش رسانایی گرمایی و درنتیجه افزایش ضریب انتقال حرارت هم‌رفتی می‌شود؛ به‌عنوان مثال در Re=۱۰۰۰ افزایش کسر حجمی نانوذرات از ۰ به ۱٪ ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را برای حدود ۱٦,٤٪ افزایش می‌دهد و برای عدد Re=۱۵۰۰ این افزایش برابر ۱۸٪ است و در کوچک‌ترین عدد رینولدز مطالعه‌شده یعنی Re=۳۰۰ تقریباً برابر ۷٪ است. اثر افزایش نانوذرات را می‌توان براساس دمای متوسط و بیشینهٔ دمایی سطح در تماس انباره با چاه حرارتی نیز بررسی کرد. با افزایش غلظت نانوذرات و بهبود عمکرد انتقال حرارت در سیستم، دمای سطح انباره نیز کاهش می‌یابد، زیرا نیاز به گرادیان دمایی کمتری برای انتقال حرارت تولیدشده است. این نکته در نمودار شکل (۵) ارائه شده‌است. این شکل روند کاهشی دمای متوسط سطح انبارهٔ لیتیوم- یون را در اثر افزایش غلظت نانوذرات نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که عملکرد نانوذرات در رینولدزهای پایین بهتر است و افزودن غلظت نانوذرات در رینولدزهای پایین‌تر موجب شده‌است که دمای سطح انباره تغییر بیشتری داشته باشد؛ به‌عنوان مثال در Re=۱۵۰۰ افزایش کسر حجمی نانوذرات از صفر به ۱٪ دمای متوسط در تماس انباره را ۰/۲٦٪ کاهش می‌دهد. هم‌چنین برای Re=۵۰۰ این کاهش حدوداً برابر ۰/۷٪ است و در Re=۳۰۰ تقریباً برابر با ۱٪ می‌باشد.

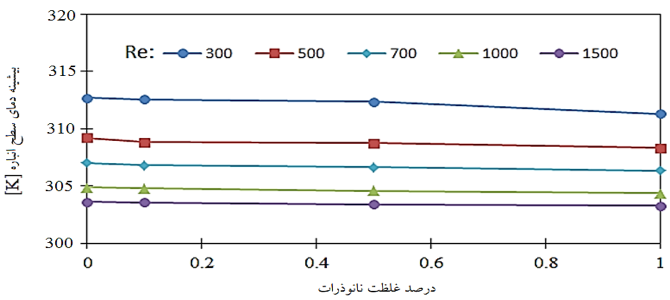


شکل ٤ ضریب انتقال حرارت کلی میکروکانال و میکرولولهٔ چاه حرارتی خنک‌کننده

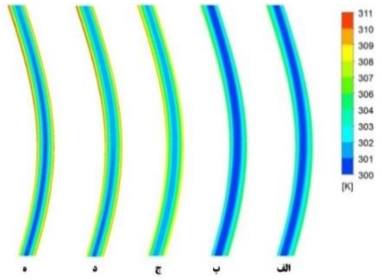


شکل ۵ تغییرات دمای متوسط سطح انبارهٔ لیتیوم- یون

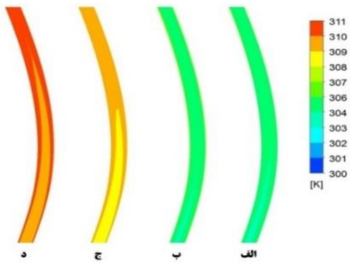
در کنار متوسط دمای سطح انباره نکتهٔ مهم دیگر بیشینهٔ دمای آن و میزان یکنواختی دمای انباره است؛ زیرا افزایش بیش از حد دما و وجود اختلاف دمای بالا موجب تأثیر منفی در عملکرد انبارهٔ لیتیوم- یون می‌شود. به‌منظور بررسی این نکته نمودار دمای بیشینهٔ سطح تماس انباره و چاه حرارتی در شکل (٦) ارائه شده‌است. باتوجه به شکل‌های (٥ و ٦) مشاهده می‌شود که دمای متوسط سطح انباره ۳۰۲ درجهٔ کلوین و رینولدز جریان ۱۰۰۰ است درحالی‌که بیشینهٔ دمای سطح ۳۰٤ کلوین محاسبه شده‌است. این تفاوت به‌دلیل غیریکنواخت بودن انتقال حرارت در سطح تماس است زیرا که شرایط انتقال حرارتی و مقاومت حرارتی تمامی نقاط روی سطح تماس به یک میزان نیست و این امر موجب اختلاف دما روی سطح انباره می‌شود. در این‌جا نیز حضور نانوسیال موجب بهبود عملکرد خنک‌کاری شده و دمای بیشینه را کاهش داده‌است. مشخص است که وجود هم‌زمان میکرولوله در کنار میکروکانال در سیستم خنک‌کننده موجب بهبود دسترسی انتقال حرارت در قسمت‌های مختلف چاه حرارتی و کاهش مقاومت حرارتی انباره شده‌است. هرچه دمای داخل مجاری یکنواخت‌تر باشند به معنی اختلاط بهتر جریان سیال خنک‌کننده و عملکرد مناسب‌تر آن مجرای خنک‌کاری است. در شکل (۷) کانتور دمای نانوسیال در ناحیهٔ موج خروجی مشاهده می‌شود. در تمامی حالت‌ها دیواره‌ها داغ‌تر از قسمت مرکزی آن است اما در دو شکل (الف) و (ب) دمای قسمت مرکزی بدون تغییر باقی مانده‌است و اثر افزایش نانوذرات در پخش حرارت از دیواره‌ها به مرکز جریان قابل تشخیص نیست. این نتیجه به‌دلیل بالا بودن سرعت جریان و قوی‌تر بودن قدرت جابه‌جایی جریان درراستای خود نسبت‌به قدرت پخش رسانشی حرارت در مسیر عمود بر جریان است. در شکل‌های (ج)، (د) و (ه) که مربوط به رینولدز ۳۰۰ است، به‌دلیل پایین‌تر بودن قدرت جابه‌جایی جریان، پخش حرارتی در مسیر عمود بر جریان بهتر رخ داده‌است و افزایش نانوذرات این پدیده را سرعت بخشیده‌است به‌طوری‌که تغییرات دما به مرکز جریان نیز رسیده‌است. برای رسیدن دما به هستهٔ مرکزی جریان نیاز به گرادیان دمایی درراستای عمود بر مسیر جریان می‌باشد و این به‌معنای افزایش دمای سیال در دیواره است که این امر موجب کاهش ضریب انتقال حرارت بین سیال و بدنهٔ جامد می‌شود و از سوی دیگر موجب افزایش دمای سطح در تماس با انباره درجهت انتقال شار حرارتی تولیدشده می‌گردد. در شکل (۸) نیز مشخص است که به‌دلیل کوچک‌تر بودن سطح مقطع جریان انتقال حرارت درراستای عمودی بسیار قوی‌تر عمل کرده‌است و درنتیجه تغییرات دمایی بسیار بیشتری مشاهده می‌شود. از بررسی تغییرات دمایی سیال خنک‌کننده در چاه گرمایی این نتیجه حاصل می‌شود که نانوسیال به‌علت داشتن ضریب انتقال حرارتی بالا گزینهٔ بسیار مناسبی برای خنک‌کاری باتری‌های لیتیوم- یون است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که نانو سیال آب/اتیلن گلیکول ۰.۵٪- نقره، علاوه‌بر این‌که دمای مجموعه را تا حد زیادی پایین نگه می‌دارد، دمای خودش نیز نسبت‌به سیال خالص، افزایش کمتری دارد؛ لذا از نظر میزان انتقال گرما، برتری نانوسیال بر سیالات خالص خنک‌کننده قابل توجه است.



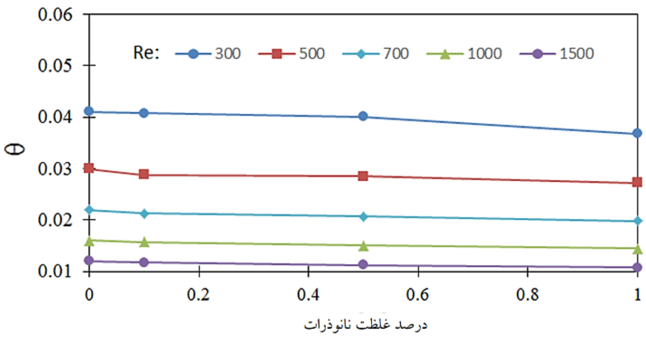
شکل ٦ تغییرات بیشینهٔ دمای سطح انباره برای غلظت و رینولدزهای مختلف



شکل ۷ توزیع دمای سیال خنک‌کننده در میکروکانال مستطیلی
الف) Re = ۷۰۰، φ=۰٪/۱ ب) Re = ۷۰۰، φ=۱٪
ج) Re = ۳۰۰، φ=۱٪د) Re = ۳۰۰، φ=۰٪/۵
ه) Re = ۳۰۰، φ=۰٪/۱



شکل ۸ توزیع دمای سیال خنک‌کننده در میکرولوله
الف) Re = ۷۰۰، φ=٪۱ ب) Re = ۷۰۰، φ=٪۰/۱
ج) Re = ۳۰۰، φ=٪۱د) Re = ۳۰۰، φ=٪۰/۵
ه) Re = ۳۰۰، φ=٪۰/۱

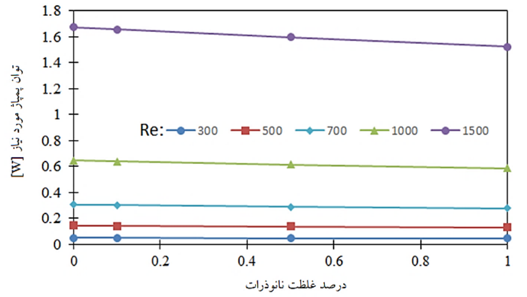


شکل ۹ بررسی یکنواختی دمای سطح تماس چاه حرارتی و انبارهٔ لیتیوم- یون با پارمتر θ

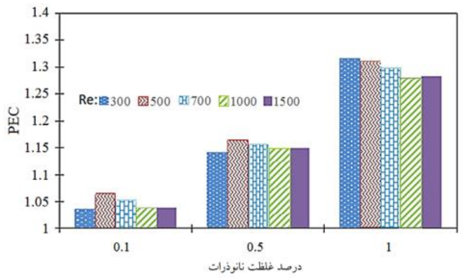
شکل (۹) نسبت گستردگی دما به متوسط دمای سطح تماس انبارهٔ لیتیوم- یون و چاه حرارتی خنک‌کننده را نشان می‌دهد. هر چه این عدد کوچک‌تر باشد به‌معنای توزیع یکنواخت‌تر دما روی سطح انباره است. باتوجه به افزایش ضریب انتقال حرارت در اثر افزوده شدن نانوسیال، بهبود عملکرد حرارتی سیستم خنک‌کننده مشخص است و همچنین مشاهده می‌شود که دما نیز روی سطح انبارهٔ لیتیوم- یون یکنواخت‌تر است اما رابطهٔ معکوسی بین اثر غلظت نانوسیال با رینولدز جریان سیال خنک‌کننده وجود دارد و هر چه رینولدز جریان بالاتر باشد، به‌علت قوی‌تر بودن ترم جابه‌جایی درون جریان، توزیع دما یکنواخت‌تر می‌شود و درنتیجه اثر افزوده شدن نانوسیال چشم‌گیر نخواهد بود؛ به‌طور مثال در Re=۳۰۰ با افزایش غلظت از صفر تا ۱٪ میزان تغییر θ تقریباً برابر ٤/٥٪ است که در همین شرایط برای Re=۱۵۰۰ برابر ۳٪ است و یا در غلظت ثابت برابر ۰/۵ با افزایش رینولدز از ۵۰۰ به ۱۰۰۰ مقدار θ به‌میزان ۵۰٪ بهبود یافته‌است و این میزان بهبود برای رینولدز ۷۰۰ و ۱۵۰۰ به‌ترتیب برابر ۳۰٪ و تقریباً ٦١٪ است. در مطالعهٔ حاضر روش خنک‌کاری فعال مورد نظر است و از انرژی خارجی جهت به گردش درآوردن سیال در میکروکانال و میکرولوله‌ها استفاده می‌شود؛ ازاین‌رو برای به حرکت در آوردن جریان سیال از پمپ استفاده می‌شود. در شکل (۱۰) میزان توان لازم پمپاژ جریان سیال خنک‌کننده در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌است. مشخص است که افزوده شدن نانوسیال به سیستم توان مورد نیاز پمپاژ را کاهش می‌دهد. این پدیده به‌دلیل کاهش سرعت جریان در اثر افزایش چگالی سیال و حفظ عدد رینولدز جریان رخ می‌دهد علاوه‌بر این، شکل (۱۰) نشان می‌دهد که افزایش عدد رینولدز منجر

به افزایش قابل توجه قدرت پمپاژ سیستم می‌شود که به‌دلیل افزایش سرعت نانوسیال و درنتیجه افزایش فشار است. برای مقایسهٔ کلی بین بهبود عملکرد حرارتی و هزینهٔ پمپاژ افزوده شده به سیستم پارامتر PEC تعریف شده‌است که با مبنا قرار دادن حالت سیال پایه به‌عنوان حالت مبنا، اثر عملکرد حرارتی و هیدرولیکی را همزمان در نظر می‌گیرد.

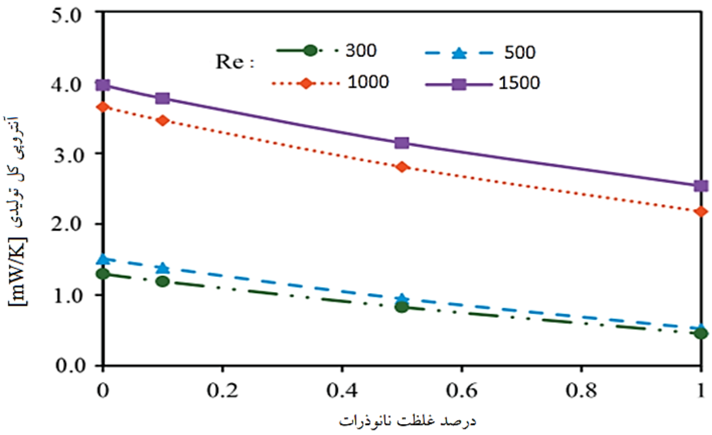
در شکل (۱۱) مشخص است که افزوده شدن نانوسیال به سیستم در حالت‌های مختلف اثر یکسانی ندارد؛ به‌طوری‌که در غلظت ۰/۱٪ بهبود عملکرد حداکثری ۵٪ را دارد اما در غلظت ۰/۵٪ بهبود عملکرد حداکثر ۱۵٪ را از خود نشان داده‌است و درنهایت غلظت ۱٪ بهبود ۳۵٪ را دارد، و به‌طور کلی افزوده شدن نانوذرات به بهبود خواص پخش حرارتی سیال کمک می‌کند. در ادامه نتایج میزان آنتروپی تولیدی در چاه خنک‌کننده ارائه شده‌است. در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود که افزایش عدد رینولدز جریان نانوسیال خنک‌کننده موجب افزایش تولید آنتروپی می‌شود که عامل اصلی این افزایش ناشی از تولید آنتروپی اصطکاکی است زیرا افزایش عدد رینولدز منجر به نازک شدن لایهٔ مرزی هیدرودینامیکی و افزایش گرادیان سرعت می‌شود که نرخ تولید آنتروپی اصطکاکی را نیز افزایش می‌دهد. همچنین افزایش غلظت ذرات نانو موجب کاهش آنتروپی شده‌است زیرا هر دو نرخ تولید آنتروپی حرارتی و اصطکاکی کاهش می‌یابند و در نتیجه کاهش نرخ تولید آنتروپی کل اجتناب‌ناپذیر است.



شکل ۱۰ توان پمپاژ مورد نیاز سیستم خنک‌کنندهٔ انبارهٔ لیتیوم-یون



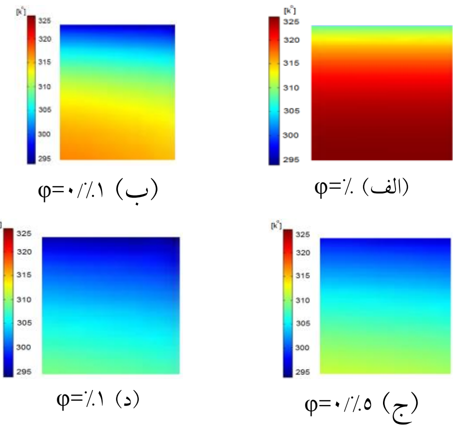
شکل ۱۱ نمودار PEC و مقایسهٔ کلی بین بهبود عملکرد حرارتی و هزینهٔ پمپاژ



شکل ۱۲ مقایسهٔ میزان تولید آنتروپی در مجموعهٔ چاه حرارتی خنک‌کننده و انبارهٔ لیتیوم- یون

جدول ٦ درصد کاهش آنتروپی اصطکاکی با افزایش غلظت نانوذرات نسبت‌به سیال خالص

درصد غلظت	۰/۱٪	۰/۵٪	۱٪
درصد کاهش آنتروپی	۱٪	٤/۷٪	۹٪



شکل ۱۳ کانتورهای دمایی سطح انباره

در جدول (٦) به درصد کاهش آنتروپی اصطکاکی ناشی از افزایش غلظت نانوذرات اشاره شده‌است. در کانتورهای شکل (۱۳) تغییرات دمایی سطح تماس مجموعه سلول‌های باتری با چاه حرارتی خنک‌کننده در رینولدز ثابت برابر ۷۰۰ برای غلظت‌های مختلف نانوسیال نشان داده شده‌است. از مقایسهٔ کلی کانتورهای دمایی مشخص است که این شرایط خنک‌کاری باعث کاهش دمای بیشینه در مجموعهٔ باتری‌ها می‌شود؛ زیرا عبور نانوسیال خنک‌کننده از طریق انتقال گرمای رسانشی و انتقال گرمای جابه‌جایی در چاه حرارتی خنک‌کننده باعث کاهش دمای مجموعه می‌شود. دمای سیال خنک‌کننده در ابتدای ورود با دمای محیط برابر است و هر چه درون میکروکانال و میکرو لوله‌های چاه حرارتی و در امتداد سطح انباره جریان می‌یابد گرمای بیشتری جذب خود می‌کند و هنگام خروج بیشترین دما را دارد که در شرایط دمای عملیاتی بحرانی باتری‌ها، یعنی نرخ‌های شارژ و دشارژ بالا، برای سیال خالص تنها ۹ درجه از ماکزیمم دمای سطح انباره کمتر است. و در غلظت٪۱ که بیشترین غلظت نانوسیال بررسی‌شده در این تحقیق است تقریباً با دمای سطح انباره برابر است. هم‌چنین بااستفاده از این سیستم خنک‌کننده می‌توان دمای باتری‌ها را در بهترین حالت محدودهٔ ۲۹۵ تا ۳۰۵ درجهٔ کلوین نگه داشت. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش غلظت نانوذرات، اختلاف دمای بین سلول‌ها در طول سطح تماس انباره با چاه حرارتی، کاهش می‌یابد و در بیشترین غلظت نانوذرات در سیستم خنک‌کننده این اختلاف دما به حداقل می‌رسد و تقریباً برابر ۵ درجه است. وجود میکرولوله، به‌دلیل افزایش سطح انتقال حرارت و کاهش مقاومت حرارتی نواحی مختلف سطح انباره نیز عامل مهمی است که باعث توزیع یکنواخت‌تر دمای سطح انباره شده‌است.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر یک طرح جدید از میکروچاه حرارتی برای خنک‌کاری باتری لیتیوم- یون ارائه شد. از جمله نتایج به‌دست‌آمده این است که ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی نانوسیال با افزایش کسر حجمی نانوسیال و عدد رینولدز افزایش می‌یابد. اثر افزایش غلظت نانوذرات، در جریان با رینولدزهای بالاتر، چشم‌گیرتر است؛ به‌طوری‌که در بیشترین رینولدز مطالعه‌شده یعنی Re=۱۵۰۰ این افزایش برابر ٪۱۸ است. هم‌چنین افزایش این دو پارامتر منجر به بهبود یکنواختی دمای سطح تماس انباره می‌شود. بااستفاده از این سیستم خنک‌کننده می‌توان دمای باتری‌ها را در بهترین حالت در محدودهٔ ۲۹۵ تا ۳۰۵ درجهٔ کلوین نگه داشت. در مطالعهٔ حاضر برای به حرکت در آوردن جریان سیال از پمپ استفاده می‌شود. در ادامه مشخص شد که قدرت پمپاژ سیستم خنک‌کنندهٔ انباره، با افزایش کسر حجمی نانوذرات و عدد رینولدز به‌ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. از سوی دیگر با افزایش رینولدز جریان به‌علت قوی‌تر شدن ترم جابه‌جایی درون جریان، توزیع دما یکنواخت‌تر می‌شود، به‌طوری‌که در غلظت ثابت برابر ۰/۵ با افزایش رینولدز از ۵۰۰ به ۱۰۰۰ بهبود پارامتر یکنواختی دما به‌میزان ٪۵۰ است. این نتیجه نیز به‌دست آمد که افزایش عدد رینولدز جریان موجب افزایش تولید آنتروپی می‌شود.

واژه نامه

میکروکانال	Microchannel
میکرولوله	Microtube
چاه حرارتی موجی شکل	Wave-shaped heatsink
انتقال حرارت جابجایی	Convection heat transfer
روش حجم محدود	Finite volume method
حل عددی	Numerical solution
معادلات حاکم	Governing Equation
نانوسیال	Nanofluid
سیستم خنک کاری	Cooling system
مدیریت حرارتی	Thermal management
باتری‌های لیتیوم- یون	Lithium-ion batteries
پایداری حرارتی	Thermal stability

مراجع

1. Liu, X., Chen, Z., Zhang, C., Wu, J., "A Novel Temperature-Compensated Model for Power Li-Ion Batteries with Dual-Particle-Filter State of Charge Estimation", *Applied Energy*, Vol. 123, pp. 263-272, (2014).
2. Ebrahimi, KM., "Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles", *CRC press*, (2018).
3. Crawford, AJ., Huang, Q., Kintner-Meyer, MC., Zhang, JG., Reed, DM., Sprenkle, VL., Viswanathan, VV., Choi, D.,"Lifecycle Comparison of Selected Li-Ion Battery Chemistries Under Grid and Electric Vehicle Duty Cycle Combinations", *Journal of Power Sources*, Vol. 380, pp. 185-193, 15 March, (2018),
4. Liu, D., Xie, W., Liao, H., Peng, Y., "An Integrated Probabilistic Approach to Lithium-Ion Battery Remaining Useful Life Estimation", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 64, No. 3, pp. 660- 670, March (2015).
5. Wang, T., Tseng, KJ., Zhao, J., "Development of Efficient Air-Cooling Strategies for Lithium-Ion Battery Module Based on Empirical Heat Source Model", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 90, pp. 521-529, (2015).
6. Zhang, T., Gao, Q., Wang, G., Gu, Y., Wang, Y., Bao, W., Zhang, D., "Investigation on the Promotion of Temperature Uniformity for the Designed Battery Pack with Liquid Flow in Cooling Process", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 116, pp. 655-662, (2017).
7. Zhao, R., Gu, J., Liu, J., "An Experimental Study of Heat Pipe Thermal Management System with Wet Cooling Method for Lithium Ion Batteries", *Journal of Power Sources*, Vol. 273, pp. 1089-1097, (2015).
8. Coleman, B., Ostanek, J., Heinzel, J., "Reducing Cell-to-Cell Spacing for Large-Format Lithium Ion Battery Modules with Aluminum or PCM Heat Sinks Under Failure Conditions", *Applied Energy*, Vol. 180, pp. 14-26, 15 October, (2016).
9. Tuckerman, DB., Pease, RF., "High-Performance Heat Sinking for VLSI", *IEEE Electron Device*

Letters. Vol. 2, No. 5, pp. 126-129, (1981).

10. Rao, Z., Wang, S., "A Review of Power Battery Thermal Energy Management", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 15, No. 9, pp. 4554-4571, (2011).
11. Liang, J., Gan, Y., Li, Y., "Investigation on the Thermal Performance of a Battery Thermal Management System Using Heat Pipe Under Different Ambient Temperatures", *Energy Conversion and Management*, Vol. 155, pp. 1-9, (2018).
12. Mashayekhi, M., Houshfar, E., Ashjaee, M., "Development of Hybrid Cooling Method with PCM and Al2O3 Nanofluid in Aluminium Minichannels Using Heat Source Model of Li-Ion Batteries", *Applied Thermal Engineering*. Vol. 178, P. 115543, (2020).
13. Qian, Z., Li, Y., Rao, Z., "Thermal Performance of Lithium-Ion Battery Thermal Management System by Using Mini-Channel Cooling", *Energy Conversion and Management*. Vol. 126, pp. 622-631, (2016).
14. Sato, N., "Thermal Behavior Analysis of Lithium-Ion Batteries for Electric and Hybrid Vehicles", *Journal of Power Sources*. Vol. 99, No. 1-2, pp. 70-77, (2001).
15. Fang, G., Huang, Y., Yuan, W., Yang, Y., Tang, Y., Ju, W., Chu, F., Zhao, Z., "Thermal Management for a Tube–Shell Li-Ion Battery Pack Using Water Evaporation Coupled with Forced Air Cooling", *RSC Advances*, Vol. 9, pp. 9951-9961, (2019).
16. Mohammadian, SK., Zhang, Y., "Thermal Management Optimization of an Air-Cooled Li-Ion Battery Module Using Pin-Fin Heat Sinks for Hybrid Electric Vehicles", *Journal of Power Sources*. Vol. 273, pp. 431-439, (2015).
17. Park, H., "A Design of Air Flow Configuration for Cooling Lithium Ion Battery in Hybrid Electric Vehicles", *Journal of Power Sources*, Vol. 239, pp. 30-36, (2013).
18. Schmalstieg J, Käbitz S, Ecker M, Sauer DU, "From Accelerated Aging Tests to a Lifetime Prediction Model: Analyzing Lithium-Ion Batteries", *in Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, DOI: 10.1109/EVS.2013.6914753, IEEE, pp. 1-12, (2013).
19. Wu, MS., Liu, KH., Wang, YY., Wan, CC., "Heat Dissipation Design for Lithium-Ion Batteries", *Journal of Power Sources*. Vol. 109, No. 1, pp. 160-166, (2002).
20. Nelson, P., Dees, D., Amine, K., Henriksen, G., "Modeling Thermal Management of Lithium-Ion PNGV Batteries", *Journal of Power Sources*., Vol. 110, No. 2, pp. 349-356, (2002).
21. Karimi, G., Li, X., "Thermal Management of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles", *International Journal of Energy Research*, Vol. 37, No. 1, pp. 13-24, (2013).
22. Zhao, J., Rao, Z., Li, Y., "Thermal Performance of Minichannel Liquid Cooled Cylinder Based Battery Thermal Management for Cylindrical Lithium-Ion Power Battery", *Energy Conversion and*

Management, Vol. 103, pp. 157-165, (2015).

23. Al-Rashed, AA., Shahsavar, A., Rasooli, O., Moghimi, MA., Karimipour, A., Tran, MD., "Numerical Assessment into the Hydrothermal and Entropy Generation Characteristics of Biological Water-Silver Nano-Fluid in a Wavy Walled Microchannel Heat Sink", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 104, pp. 118-126, (2019).
24. Zheng, J., Xu, Y., Gao, X., Zheng, J., He, H., Li, Z., "Transient Thermal Behavior of Internal Short-circuit in Lithium Iron Phosphate Battery", *International Journal of Electrochemical Science*, Vol. 13, pp. 11620-11635, (2018).
25. Sarafraz MM, Hormozi FJ., "Intensification of Forced Convection Heat Transfer Using Biological Nanofluid in a Double-Pipe Heat Exchanger", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 66, pp. 279-289, (2015).
26. Bejan, A., "Advanced Engineering Thermodynamics", *John Wiley & Sons*, pp. 96-130, (2016).
27. Sui, Y., Lee, PS., Teo, CJ., "An Experimental Study of Flow Friction and Heat Transfer in Wavy Microchannels with Rectangular Cross Section", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, No. 12, pp. 2473-2482, (2011).

Cooling Lithium-ion Battery Assemblies using Nanofluids by Heat Sink

Akram Jahanbakhshi[1], Afshin Ahmadi Nadooshan[2], Morteza Bayareh[3]

1. Introduction

Lithium-ion batteries are used in a variety of industries, including electric vehicles, due to their good heat capacity, relatively long life, and low discharge rate compared to other types of batteries. It is important to consider their thermal stability or explosion due to overheating and non-uniform heat distribution. Therefore, the design and application of a battery cooling system and proper thermal management are considered. In this research, by combining microchannels and microtubes in a wave-shaped heatsink, a new design of cooling micro heatsink is presented for the battery pack. Silver/water-ethylene glycol (50:50) nanofluid is used. Modeling is performed for different volume fractions of nanoparticles including 0%, 0.1%, 0.5%, and 1%, and Reynolds numbers of 300, 500, 700, 1000, and 1500.

2. Geometry and Numerical Methods

Figure 1 shows the overall geometry of a thermal micro heatsink, which has 50 wavy channels and microtubes between the each two microchannels.

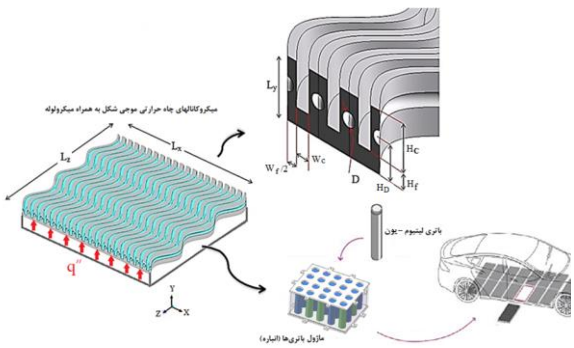


Figure 1. The geometry and its application

The waveform of the channel and tube along the heatsink is a sine function as follows:

$$S(z) = a_W \sin\frac{2\pi z}{L_W} \qquad (1)$$

Where $a_W = 138\mu m$ and $L_W = 5mm$. In order to solve the equations, ANSYS FLUENT software is used. Then, a grid with 195,000 elements is selected as the solution grid. Figure 2 show a schematic of the computational domain.

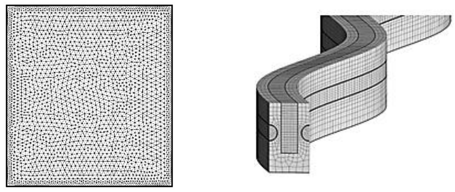


Figure 2. Schematic of the computational domain

3. Results and Discussion

Figure 3 shows that an increment in the concentration of nanofluid enhances the heat transfer coefficient and this effect is greater for higher Reynolds numbers. Increasing the volume fraction of nanoparticles leads to an increase in the thermal conductivity and thus an increase in the convective heat transfer coefficient. The effect of increasing nanoparticles can also be investigated based on the average storage temperature. By increasing the concentration of nanoparticles and improving heat transfer performance in the system, the storage surface temperature decreases because the need for a lower temperature gradient for heat transfer is generated (Figure 4).

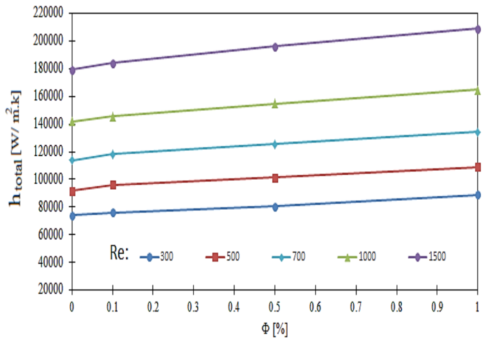


Figure 3. Total heat transfer coefficient

Figure 5 shows the ratio of the temperature range to the average temperature of the contact surface of the lithium-ion storage and the heatsink.

$$\theta = \frac{T_{batteries,Max} - T_{batteries,min}}{T_{batterise,Meam}} \qquad (2)$$

The smaller this number, the more uniform the distribution of the storage surface temperature. The higher the Reynolds number, the more

[1]. PhD Candidate, Engineering Faculty, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

[2]. Corresponding Author: Associated Professor, Engineering Faculty, Shaharekord University, Shahrekord, Iran, Email: ahmadi@sku.ac.ir

[3]. Associated Professor, Engineering Faculty, Shaharekord University, Shahrekord, Iran

uniformity of the temperature distribution due to the stronger convection effect.

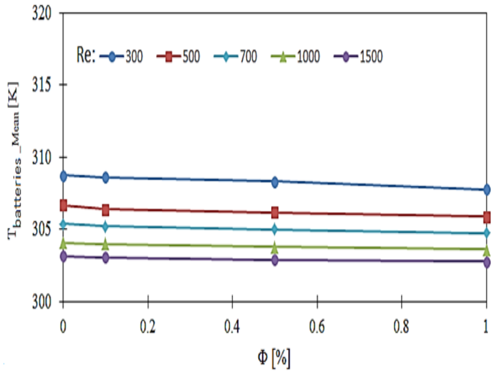


Figure 4. Average storage temperature

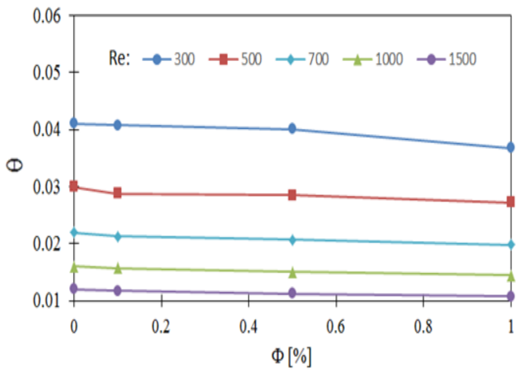


Figure 5. Storage surface temperature uniformity

General comparison between the improvement of thermal performance and the cost of pumping power shows that adding nanofluid to the system does not have the same effect in different states. At a concentration of 0.1%, it has a maximum performance improvement of 5%, but at a concentration of 0.5%, it showed a maximum improvement of 15%. Contours of Figure 6 demonstrate that at the critical operating temperature of the batteries, the pure surface temperature is only 9 degrees lower than the maximum for the pure fluid. At a concentration of 1%, which is the maximum concentration of nanofluid studied, the critical operating temperature is approximately equal to the storage surface temperature.

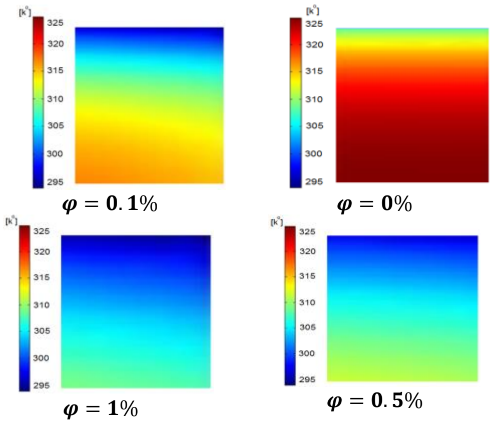


Figure 6. Storage surface temperature counters.

4. Conclusion

This study presented a new design of thermal heatsink for cooling lithium-ion batteries. It was found that the convection heat transfer coefficient of nanofluid increases with the volume fraction of nanofluid and Reynolds number. Moreover, using this cooling system, the temperature of the batteries can be kept in the best range, from 295 to 305 K. At all studied concentrations, the maximum temperature difference at the surface is 5 and 7 K, respectively. It was also found that increasing the nanofluid concentration provides a more uniform temperature. At higher Reynolds numbers, although the temperature distribution is more uniform, increasing the nanofluid concentration has no significant effect. For example, at Re=300, the improvement of surface temperature uniformity is 4.5% with increasing the concentration from zero to 1%. On the other hand, an increment in the Reynolds number has a negative effect on the pumping power of the coolant. Moreover, the rate of thermal and frictional entropy generation decreases with the volume fraction of nanoparticles. For instance, the reduction of frictional entropy is 9% smaller than that of pure fluid for a concentration of 1%.